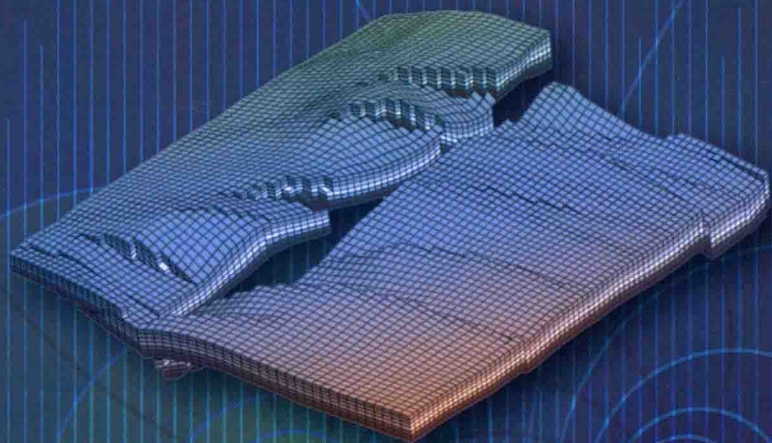




国家自然科学基金委员会-中国铁路总公司
高速铁路基础研究联合基金重点支持项目资助



地震预警理论与方法研究 及在高速铁路的应用

◆ 王子珺 赵伯明 著



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

地震预警理论与方法研究 及在高速铁路的应用

策划编辑: 陈跃琴
责任编辑: 陈可亮
封面设计: 乔 楚



扫描二维码, 申请样书,
了解北交大社最新书讯

ISBN 978-7-5121-3895-7



9 787512 138957 >

定价: 38.00 元

国家自然科学基金委员会-中国铁路总公司
高速铁路基础研究联合基金重点支持项目资助

地震预警理论与方法研究 及在高速铁路的应用

王子珺 赵伯明 著

北京交通大学出版社
• 北京 •

内 容 简 介

本书针对地震防灾减灾领域的关键科学问题,开展了关于地震紧急预警基础理论方法与地震动对结构破坏性的深入系统研究,提出了高精度地震紧急预警的理论与方法,建立了地震动与结构破坏的相关关系。研究成果为开展快速准确的地震预警和早期灾害预测,构建更加合理的紧急预警与灾害评估相结合的地震应急系统提供了科学依据。

本书可供从事地震工程、地震预警、防灾减灾等专业的教学、科研、设计人员在工作中参考阅读。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

地震预警理论与方法研究及在高速铁路的应用 / 王子珺, 赵伯明著. —北京: 北京交通大学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-5121-3895-7

I. ① 地… II. ① 王… ② 赵… III. ① 高速铁路-地震灾害-预警系统 IV. ① P315.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 079322 号

地震预警理论与方法研究及在高速铁路的应用

DIZHEN YUJING LILUN YU FANGFA YANJIU JI ZAI GAOSU TIELU DE YINGYONG

策划编辑: 陈跃琴 责任编辑: 陈可亮

出版发行: 北京交通大学出版社 电话: 010-51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

地 址: 北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编: 100044

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170 mm×235 mm 印张: 9.5 字数: 132 千字

版 次: 2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-3895-7/P·10

定 价: 38.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

作者介绍

王子珺，女，1989 年 11 月生，北京交通大学土木建筑工程学院讲师，工学博士，先后在英国伯明翰大学和美国哥伦比亚大学从事博士后研究。主要研究领域为轨道交通等重大工程抗震理论与方法、地震紧急预警理论与应用。主持国家自然科学基金青年基金 1 项，国家重点研发计划子课题 1 项，国家重大科学工程专题 2 项，作为主要人员完成国家自然科学基金重点项目等国家级科研课题 6 项，发表学术论文 20 余篇，以第一作者在 SDEE 等权威期刊发表 SCI 检索论文 6 篇，在《中国铁道科学》《土木工程学报》发表 EI 检索论文 4 篇，申请国家发明专利 2 项，编著学术专著 2 部。

赵伯明，男，1963 年 4 月生，北京交通大学土木建筑工程学院教授，工学博士，博士生导师，防灾工程研究所所长，防灾减灾及防护工程学科责任教授，主要从事社会基础设施抗震防灾与工程安全的研究与教学。研究成果应用于城市系统以及高铁、地铁、水电和核电等重大工程设施，在相关领域积累了比较丰富的经验。主持完成自然科学基金重点项目、自然科学基金面上项目、国家科技支撑计划以及国家重大科学工程等国家级课题 20 余项，科技部、铁道部、国土资源部等省部级课题 30 余项。发表学术论文 120 余篇，编著学术著作 6 部。现担任全国标准化技术委员会委员，中国地震局城市地震危害性评价专家，国家铁路局及中国铁路总公司工程专家。

前 言

地震预警是国际上非常新颖和热门的学科方向及研究焦点，具有非常急迫的社会应用需求和学术研究价值，并且有望与传统的结构抗震达到同样的抗震减灾效果。国务院颁布的《国家防震减灾规划（2016—2020 年）》明确指出，“十三五”时期防震减灾工作的目标之一是形成体现我国地域特色、具有重要国际影响的地震科技优势领域，在大陆强震机理与预测技术、地震监测预警技术、地震成灾机理与减灾技术等方面取得突破性进展，达到国际先进水平。

我国在地震预警的基础理论研究及其应用研究方面起步较晚，相对于地震监测网络的建设进展，尚缺乏适合我国地震环境特点的地震预警理论与方法体系。针对我国面临的潜在地震危险，应当尽快研究发展自己的地震监测预警和震后应急体系，实现持续保障人民生命财产和社会稳定、安全的目的。因此开展适合我国环境特点的地震监测预警理论与方法研究具有重要的科学意义和广泛的应用价值，并为社会基础设施抗震减灾提供科学依据。

书稿第一部分（第 1 章）：简要介绍研究背景与研究意义，阐述把握强地震动特性与结构损伤之间关系和开展地震预警理论与方法研究所具有的急迫社会应用需求和学术研究价值，以及将两者结合考虑发展地震应急防灾系统的科学性与重要性。回顾总结国内外地震预警理论方法和地震动对结构破坏性的相关研究进展及应用情况，同时针对地震预警在高速铁路等领域的研究与应用现状，归纳总结了我国高铁地震监测预警所面临的主要课题。

书稿第二部分（第 2~4 章）：介绍地震预警不同震相的快速识别理论与方法研究，针对地震预警的实际需求，研究提出一套适合于单台站地震预警的三步骤 P 波与 S 波复合自动快速识别理论与方法。介绍地震预警快速准确

确定震级以及场地地震动的理论与方法研究，基于提出的位移平方积分参数的震级预测方法以及基于 3 s 初始 P 波的谱强度的地震动预测方法，推导得到相应的震级预测公式和地震动预测公式。针对大地震预警中出现的“饱和”问题予以探讨并提供解决方法。

书稿第三部分（第 5 章）：介绍基于理论地震动的预警方法研究与验证。通过构建三维震源模型和三维地下速度结构模型，开展三维宽频带地震动模拟计算，把握震源—传播路径—场地效应的全过程中不同地震动参数与初始特征参数之间的关联性，开展基于理论地震动的初始参数的震级预警方法和场地地震动预警方法的分析与验证。通过研究，提出通过地震动数值模拟的手段开展地震预警理论与方法研究的基本理念和研究路线。

书稿第四部分（第 6 章）：介绍大地震的地震动性质与结构破坏效应基础研究。分析大地震作用下结构破坏和区域震害的特征与规律，评价大地震的破坏能力，研究推导结构破坏与不同地震动参数之间的易损性关系法则。考虑不同结构类型对地震荷载输入的响应，研究提出有效评估结构损伤等级的方法。

由于作者学识有限，疏忽谬误之处敬请读者不吝赐教。

目 录

第 1 章 地震预警理论与方法研究概述	1
1.1 地震预警理论方法体系	1
1.1.1 地震预警理论与方法研究	4
1.1.2 地震动对结构破坏性研究	14
1.2 高速铁路地震预警模式规划方案	19
1.2.1 国内外高速铁路地震监测、预警现状研究	19
1.2.2 我国高速铁路地震预警建设方案	22
第 2 章 地震预警震相复合自动快速识别的理论方法与应用	26
2.1 地震 P 波与 S 波的分离算法	27
2.2 地震 P 波与 S 波的拾取算法	34
2.3 地震数据的应用与验证	38
第 3 章 地震预警震级快速准确预测理论方法研究	44
3.1 震级预测方法	45
3.1.1 地震数据与数据预处理	45
3.1.2 震级预测方法的提出	48
3.2 不同震级预测方法比较分析	52
3.3 研究预测大地震破裂尺度方法	54

第 4 章 地震预警场地地震动快速准确预测理论方法研究..... 59

4.1 地震动强度预测方法的提出与比较..... 60

4.1.1 地震数据与数据预处理 60

4.1.2 地震动预测方法与比较 62

4.1.3 不同地震动参数预测方法比较分析 67

4.2 大地震预测地震动场修正方法..... 68

4.3 基于贝叶斯方法估计地震动强度..... 71

第 5 章 基于理论地震动的预警方法研究与验证 74

5.1 地震动模拟理论与方法..... 76

5.1.1 有限交错网格差分法 76

5.1.2 运动方程与震源描述 78

5.2 地震动模拟与结果..... 81

5.2.1 计算模型与参数 81

5.2.2 模拟计算结果 84

5.3 基于理论地震波的预警方法比较与分析..... 88

5.3.1 震级预警方法比较与分析 88

5.3.2 场地地震动预警方法比较与分析 90

第 6 章 大地震的地震动与结构破坏效应研究 93

6.1 强震记录解析与强地震动特性..... 94

6.2 结构破坏与参数解析..... 99

6.2.1 易损性与结构危害性判断准则 102

6.2.2 倒塌率与强地震动参数关系 103

6.2.3 砖混结构与框架结构易损性曲线 107

6.3 结构的地震损伤评价方法..... 109

6.3.1 结构损伤评价方法 110

6.3.2 结构损伤评价结果 112

6.3.3 基于修订《规范》的结构损伤预测 114

参考文献 117

后记 140

第 1 章

地震预警理论与方法研究概述

1.1 地震预警理论方法体系

地震是危害人民生命财产的突发自然灾害，其直接灾害和次生灾害破坏人类赖以生存的文明环境，造成巨大的社会灾难和经济损失。由于我国位于环太平洋地震带与欧亚地震带的交汇部位，受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的挤压，地震断裂带十分发育，仅大陆地区就已查明分布 495 条活动断层。有近半数的城市位于Ⅶ度及以上高烈度区，存在巨大的地震安全隐患。从古至今，我国地震频度高、震级大、地震灾害严重。

在 20 世纪，全球发生 3 次 8.5 级以上的强烈地震，其中 2 次发生在中国；全球 2 次导致 20 万人以上死亡的强烈地震也均发生在中国。自新中国成立以来，内地共发生 8 级以上地震 3 次；7 级以上地震 35 次，平均每年发生约 0.7 次；6 级以上的地震 194 次，平均每年发生近 4 次。与近 100 年的活动水平（ ≥ 7 级的年均值为 0.66 次， ≥ 6 级的年均值为 3.6 次）相比较，强震活动水平高于前 50 年的活动水平。

进入 21 世纪以来，相继发生的 2008 年汶川 M_s 8.0 级特大地震和 2010 年玉树 M_s 7.1 级大地震造成了巨大人员伤亡和财产损失。特别是汶川地震，造成破坏特别严重的地区超过 10 万 km^2 ，直接受灾人口多达 1 000 多万，房屋倒塌 300 多万间，损坏 1 500 多万间。道路、桥梁、隧涵、城镇、学校、房屋、通信等基础设施损毁严重，经济损失达数千亿元人民币。汶川及邻近地区的抗震设防烈度为Ⅵ~Ⅶ度，而实际最大烈度已达到Ⅺ度。

汶川地震的建筑物严重震害现象在科学界和工程界引起了极大关注与广泛研究（例如：李小军 等，2008；欧进萍 等，2008a，2008b；赵作周 等，2008；裴星洙 等，2008；安雪晖 等，2008；叶列平等，2008）。通过分析可知，强地震动（强地面运动）的时空特性是导致大量建筑物发生破坏的最为直接的原因，大地震的强地震动特性与建筑结构的损伤或破坏之间存在必然的因果关系（Wang et al, 2015）。众所周知，强震观测和震害调查是抗震研究的重要手段，强震观测资料是定量的微观数据，可以解析相关的强地震动特性参数（Li et al, 2009）；而实际震害调查则是定性的宏观指标，能够反映结构的损伤或破坏情况。如果能够运用某种方法，建立地震动参数与建筑结构破坏之间直接的因果关系，则可以更加深入认识强地震动造成结构损伤的原因，同时结合结构自身的动力特性，提出有针对性的抗震对策，达到有效降低强烈地震对建筑物危害的目的。因此，在研究大地震的强地震动特性的基础上，开展强地震动与结构损伤或破坏之间的相关性研究，是正确把握结构的动力性能和抗震储备的关键所在，不仅能够为加强建筑结构的抗震设计提供有效依据，同时可以作为大地震时开展震害预测和应急救援的基础。

自 20 世纪初叶开始的建筑结构抗震研究，重点关注把握与提升结构自身的抗震性能。在对地震危险性合理认识的前提下，基于地震区划图和抗震设计规范，通过加强建筑结构自身的结构强度和整体性能，可以实现抗震规范规定的三个基本原则，有效达到防御地震灾害的目的。但是，由于抗震减灾需要考虑的对象涉及人类社会的方方面面，即使有现行抗震规范的规定和制约，大量不同时代建筑物并存的社会体系的抗震性能依然无法确切保证。21 世纪以来我国进入了高速发展阶段，国民经济快速持续增长，城镇化和大城市群建设不断推进，人口和物质财富向城镇高度集中，地震对人民生命和社会安全的威胁日益突出，因此需要整体提升全社会抵御自然灾害的综合系统性防范基础能力。

今后的抗震减灾方针正在逐渐从被动的防御向积极的防御转变。随着科学技术的进步，地震预警的理念越发具有可实现性与可普及性。地震预警

(Earthquake Early Warning, EEW) 是国际上非常新颖和热门的学科方向, 具有非常急迫的社会应用需求和学术研究价值, 并且有望与传统的结构抗震达到同样的防灾减灾效果 (Wu et al, 2005; Allen et al, 2009)。地震预警是指在破坏性强地震动抵达目标区域前的有限时间 (几秒至数十秒) 内, 利用专用监测预警系统发出预警信息, 进而启动防御灾害的紧急处置措施。在无法实现地震短临预报的今天, 地震预警作为减轻地震灾害的重要且有效的手段已经受到日、美、意等多地震国家的高度重视 (Kanamori, 2005; Kuyuk et al, 2015; Iannaccone et al, 2010)。尤其对于可以控制运行的生命线工程和高危行业, 例如高铁、核电站、燃气等领域, 预警系统在多次地震中已被证明是减轻地震灾害的有效措施 (Hsiao et al, 2011; Gasparini et al, 2011; Kubo et al, 2011)。

在不远的将来, 地震预警将成为地震发生后地震防御和应急的主要手段, 依据同样的理念, 关于地震灾害快速评估的研究也应运而生。目前, 美国政府和科研机构尝试的最新地震应急处置对策包括以下四项内容: (1) 基于地震 P 波预警系统发布地震发生信息; (2) 美国地质勘探局 (United States Geological Survey, USGS) 的在线烈度调查系统 (Did You Feel It, DYFI) 集约民众发布的地震烈度报告; (3) 全球地震快速评估系统 (Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response, PAGER) 快速估算地震损失和发布警报级别; (4) 开展实时余震发震概率预测。其中, 全球地震快速评估系统 PAGER 可以对地震可能造成的人员伤亡与经济损失进行快速估算, 并做出地震应急响应。PAGER 提供的重要补充信息包括易损建筑分布、历史地震损失、潜在次生灾害等, 如滑坡、海啸和沙土液化等。PAGER 通常能够在地震监测系统确定震源位置及地震震级后快速发布评估结果。由于 PAGER 采用交互系统, 随着后续信息的持续更新可以逐步提高评估精度, 必要时能够更正警报级别 (Wald et al, 2010)。以上四项功能分别基于不同时期不同目的发展而形成, 理想的目标应该是构建以地震监测系统为基础, 将不同功能集约为有机结合、相互支援的综合型应急防灾方案。

基于地震应急与灾害救援的立场，不仅需要地震预警系统提供地震发生的准确信息，而且应该及时把握地震可能造成的潜在灾害。在注重研究高精度地震预警理论和方法的同时，开展地震灾害快速预测的理论研究，并且将两者的功能综合考虑是地震应急防灾系统未来应该发展的方向。如果能够在地震监测预警系统确定地震参数之后，快速发布地震灾害评估结果，将为地震应急处置和抗震减灾等工作提供更加科学的依据。开展地震动与建筑物破坏相关性研究可以明确把握地震动对结构破坏程度，为充实地震预警的灾害评估信息和确定预警判断依据与等级提供重要保障。因此，开展地震动破坏性研究与地震预警理论方法研究具有重要意义。

1.1.1 地震预警理论与方法研究

地震发生时会产生两种主要的地震波：一种是速度较快但震动较弱的纵波（P波，传播速度约为 6.0 km/s ），另一种是速度较慢但震动较大的横波（S波，传播速度约为 3.5 km/s ）。地震预警就是利用纵波比横波传播速度快，以及电磁波（其传播速度约为 $3 \times 10^5 \text{ km/s}$ ）远比地震波传播速度快的原理来实现的（见图 1-1）。在大地震发生后，预警中心通过震中附近的地震仪捕捉到纵波，利用地震波信息快速计算出地震参数（时间、地点、震级大小）、影响

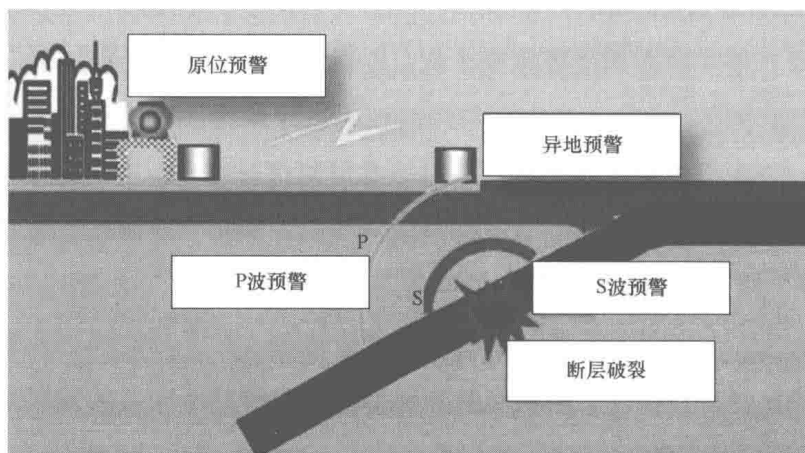


图 1-1 地震预警原理



程度和预警时间,并抢在具有更大破坏性的横波到达之前,对可能遭受破坏和影响的地区发出地震警报,为人们逃生避险和行业紧急处置预留时间。

一般而言,地震预警系统可分为异地预警模式(Regional EEW)、原位预警模式(Onsite EEW)以及混合预警模式。

异地预警模式是在距预警设防目标区一定距离外的潜在震源区布设观测台站,当观测到破坏性地震动之后再向目标区发布警报信息的预警方式。该模式能够为预警目标区提供足够的预警时间,提高地震要素测算精度,但需要架设足够多的地震台站组成预警台网,成本投入较高、复杂程度较大。同时,采用这种模式组网地震预警系统时,应当对潜在震源区充分了解。

原位预警模式是利用布设在需要预警的目标区附近的地震观测站触发后前若干秒的信息直接为目标区提供预警或报警信息。这一模式一般依靠个别台站触发,能够有效降低预警布设成本,缩小预警盲区范围。

目前,随着观测仪器、测量技术和数据传输处理方式等地震预警关键技术的发展,同时采用异地预警和原位预警混合模式的地震预警系统数量增加。混合预警模式能够充分结合两种预警方式的优势,更加充分地利用台网数据资源。

1868年美国旧金山大地震后,Cooper(1868)首次提出了构建预警系统的设想,即在地震带附近设置监测台站,当地震发生时,通过监测台站快速获取地震的方位及规模,利用地震波传播速度远小于电磁波传播速度的特点,在破坏性地震动尚未到达目标区域前实现提前报警,以提高旧金山的城市抗震防御能力。然而由于技术条件的制约该设想没有得以实现。20世纪80年代初期,日本铁道综合技术研究所的Nakamura(1984)提出了一个不同的理念,仅利用高铁沿线的单个台站获取的初始P波记录实现地震预警,并于1984年开发了地震预警系统UrEDAS(Urgent Earthquake Detection and Alarm System,紧急地震检测与报警系统)。该系统利用地震P波和S波信息快速估

计地震参数,并结合已有震害统计结果有针对性地发布地震预警信息,UrEDAS 是世界上第一套采用单台站的初始 P 波即可确定震源参数的预警系统。

在地震预警方面,日本是发展最早也是成效最为突出的国家之一(Ashiya et al, 2007; Hoshiba et al, 2008; Kamigaichi et al, 2009; Yamamoto et al, 2011; Doi, 2011)。UrEDAS 系统利用单台站地震记录,实时计算垂直分量与水平分量的地震动比,以分辨 P 波或 S 波;通过计算方位角、卓越频率等参数估计地震震级。其优点是仅利用地震触发后前 3 s 的 P 波信息实现对震源参数的估计并报警。1997 年,简化版预警系统 Compact UrEDAS 研发成功,该系统将依据震源参数估算地震动强度改变为直接推导地震动参数(烈度),通过加速度与速度向量的内积计算功率谱密度作为烈度指标,通过阈值预警的方式判断地震是否具有破坏性,为紧急处置争取了更多的时间(Ashiya, 2004; Nakamura et al, 2007; Yamamoto et al, 2013)。日本气象厅基于 200 余个地震监测台站和 800 余个强震观测台站建立了全国性紧急地震速报系统,并于 2007 年 10 月开始正式投入运行,为社会提供预警服务(Hoshiba et al, 2008; Kamigaichi et al, 2009),系统示意图如图 1-2 所示。铁路公司利

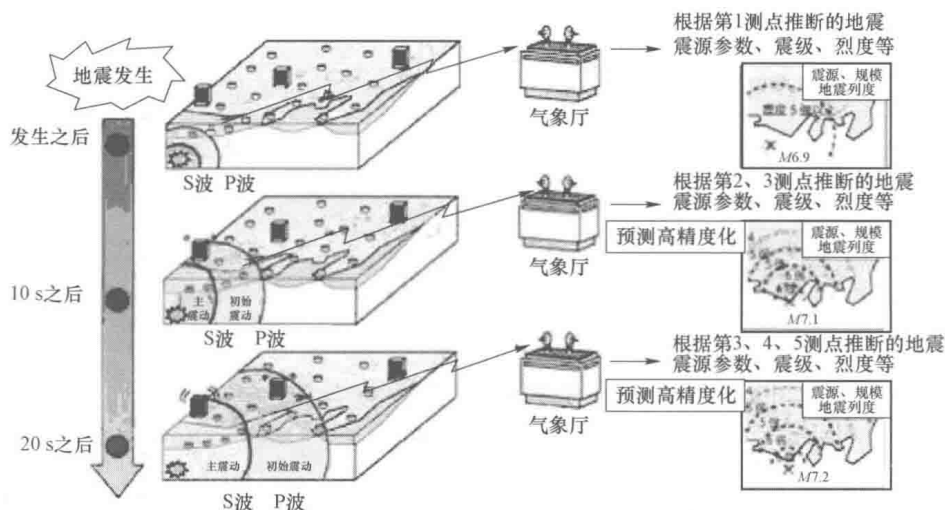


图 1-2 日本紧急地震速报系统示意图(引自日本气象厅, 2014)



用气象厅提供的紧急地震速报信息为普通列车提供地震预警服务,同时部分公司采取将自有的新干线地震监测和预警系统信息与气象厅紧急地震速报系统信息相结合的方式为普通铁路提供地震防灾服务(Ashiya et al, 2007; Yamamoto et al, 2013)。东海道新干线和东北新干线分别于2008年和2012年启用气象厅紧急地震速报系统的预警信息,为新干线地震紧急处置服务。通过对比486次烈度在4度以上的地震,其中109次烈度预测值与观测值相符,261次预测误差在 ± 1 度(日本气象厅7级烈度表)以内。

墨西哥吸取1985年 M_L 8.1级墨西哥城大地震的教训,于1989年开始设计地震预警系统SAS(Seismic Alert System)。该系统于1991年开始测试运行,1993年正式对墨西哥城民众提供预警信息服务,从而成为世界上首个为公众提供地震信息的预警系统(Espinosa-Aranda et al, 2009; Suárez et al, 2009; Espinosa-Aranda et al, 2011; Cuéllar et al, 2014)。SAS采用区域报警模式,在Guerrero沿海地区300 km长的范围内布设了间距为25 km的12台数字强震仪,每个台站配备一台微机管理。一旦地震触发,该系统随即对台站所获地震记录进行积分,时间窗长为从P波到时起至2倍P波与S波到时时间差,以获得能量参数。同时,根据能量的增长速率并结合经验公式迅速判断该地震是“强震”($M > 6.0$)或“中强震”($5.0 < M \leq 6.0$)。当2个以上的台站判定该地震为“强震”时,即向公众发布报警信息。SAS中的通信系统具有1个甚高频(VHF)中央无线电中继站和3个超高频(UHF)无线电中继站,可在2 s内将地震信息传至墨西哥城。另外,SAS将中央控制系统布设在距Guerrero海岸地区约320 km的墨西哥城,可以实现连续接收地震信号并自动处理,确定震级后决定是否发布警报信息。该信息通过商业电台发布,有关部门配置专用接收机,由专人负责接收并开展防灾救援工作。

土耳其针对Marmara区域的地震危险性,于1999年两次大地震后建立了基于100个密集强震台站的地震快速反应与早期预警系统IERREWS(Istanbul Earthquake Rapid Response and Early Warning System)(Sesetyan et